مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال سیزدهم، شمارهٔ ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹٤، شماره پیاپی ۲۵

بررسی و تحلیل شاخص های ژئومورفیک و ارتباط آن با مورفوتکتونیک فعّال در مناطق خشک (پلایای اردستان)

مصطفی خبازی(استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید باهنرکرمان، کرمان، ایران، نویسندهٔ مسؤول)
mostafakhabazi@uk.ac.ir
میثم شهبازی (دانشجوی دکتری شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران)
maysam.shahbazi@yahoo.com

صص ٦٥-٤٥

چکیده

اهداف: هدف پژوهش حاضر، بررسی فعالیّت‌های تکتونیکی حوضهٔ آبخیز اردستان با رویکرد کمّی است. نویسندگان سعی کردند از شاخص‌هایی استفاده شود که کمتر محاسبه شده باشد؛ بنابراین با توجّه به اعتبار شاخص‌های ژئومورفیک در مطالعات ژئومورفولوژی، برای ارزیابی فعالیّت‌های کواترنری پلایای اردستان، به محاسبهٔ شاخص‌های شکل حوضه(BS)، حجم به سطح حوضه(VA)، تراکم سطحی آبراهه(P)، انشعاب‌پذیری(BR)، انتگرال‌هیپسومتری[1] حوضه(HI) و سینوزیته جبههٔ کوهستان(smf) مبادرت شد.

روش: در این پژوهش ابتدا با روش کتاب‌خانه‌ای و تحلیل منابع، ۱۱ روش کمّی استخراج شد سپس متناسب با موقعیّت منطقه که در ناحیهٔ خشک و بیابانی ایران مرکزی قرار گرفته، ٦ شاخص سازگار و منطبق با مناطق خشک و اندیس‌هایی که با مورفولوژی حوضه و شبکهٔ زه‌کشی ارتباط بیشتری داشتند، محاسبه شدند. سپس برای ارزیابی فعالیّت‌های تکتونیکی از شاخص‌های شکل حوضه(BS)، حجم به سطح حوضه(VA)، تراکم سطحی آبراهه(P)، انشعاب‌پذیری(BR)، انتگرال هیپسومتری حوضه(HI) و سینوزیته جبههٔ کوهستان(smf) استفاده شد.

یافته‌ها/نتایج: نتایج این پژوهش که با شاخص Lat برآوردشده، نشان می‌دهد که بخش‌های شمال غرب و جنوب غرب محدودهٔ مورد مطالعه از نظر تکتونیک بسیار فعّال‌تر از قسمت‌های مرکزی و شرقی حوضه است. به طوری که حوضه‌های باد- خالدآباد با Lat=۲ و طرق- ابیازن با

1. Hipsometry integral

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۱۳ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۱/۲۵

Lat=۱/۸۳ دارای فعالیّت تکتونیکی زیاد و حوضه‌های اردستان Lat=۲/۳۳ و دق‌سرخ با Lat=۲/۵ دارای فعالیّت زمین‌ساختی متوسّط هستند.

نتیجه‌گیری: به نظر می‌رسد فعالیّت بخش‌های شمال غرب و جنوب غرب محدوده به عبورگسل-های مهم قم – زفره و نطنز مربوط می‌شود؛ این در حالی است که به رغم نبود پیشینهٔ لرزه‌خیزی قابل توجّه، مناطق فوق می‌تواند بیشترین توان حرکتی را در آینده داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: مورفوتکتونیک، نئوتکتونیک، پلایای اردستان، شاخص‌های ژئومورفیک.

۱. مقدمه

ناحیهٔ مورد مطالعه در نیمهٔ میانی ایران و در زون تکتونیکی ایران مرکزی قرار دارد. بلوک-های ساختمانی در این بخش از ایران نتیجهٔ فرآیند تکتونیکی آلپین جوان هستند. به طور کلّی قدیمی‌ترین فاز کوه‌زایی حوضه مربوط به اواخر پرکامبرین[1] است که منجر به دگرگونی و تشکیل سنگ‌های کم‌دگرگون شده است. پس از آن در تمام طول پرکامبرین پسین (اینفرکامبرین) و پالئوزوئیک و نیز اوایل مزوزوئیک[2] ناحیه تحت کنش‌های قاره‌زایی قرار می گیرد و این عامل باعث خروج مکّرر از دریا و فرسایش آن می‌شود که نتیجهٔ آن نبودهای چینه شناسی در این فاصلهٔ زمانی است. در اواخر تریاس، ناحیه تحت نیروهای کوه‌زایی قرار می گیرد و طبقات آن چین می‌خورند و بار دیگر با خروج قسمت‌هایی از ناحیه از آب فرسایش شدیدتر برقرار می‌شود. سپس نهشته‌های آواری مربوط به پیشروی دریای ژوراسیک روی سنگ‌های مختلفی قرار می‌گیرد که سن آن‌ها از پرکامبرین تا تریاس پیشین است. در ژوراسیک[3] و کرتاسه[4] به جز حرکات قاره‌زایی که نبودهای چینه‌شناسی را به همراه دارد، حادثهٔ مهمی رخ نمی‌دهد. در پایان کرتاسه و اوایل ترشیر با حرکات مجدد کوه‌زایی چین‌خوردگی طبقات تشدید می‌شود. این حرکات در طول ترشیر[5] همراه با فعالیّت‌های ماگمایی ادامه می‌یابد

1. Precambrian
2. Paleozoic-Mesozoic
3. Jurossic
4. Createaceous
5. Tertiary

و نتیجهٔ آن ترادف سنگ‌های ولکانیکی ضخیم و نهشته‌های توفی ائوسن است (گاهی آندزیتی) که بر روی سنگ‌های چین‌خوردهٔ کرتاسه به طور دگرشیب قرار می‌گیرند.

روند کلّی ساختمان‌های اصلی زمین‌شناسی در ناحیه منطبق با روند عمومی زون‌های تکتونیکی سنندج – سیرجان و زاگرس است. این ناحیه به دلیل برخورداری از شرایط پیچیدهٔ تکتونیکی دارای گسل‌های متعدّد است. از جمله گسل درونه در شمال، گسل نائین – بافت و مهم‌ترین آن گسل راستگرد قم – زفره با امتداد عمومی شمال غربی– جنوب شرقی بوده که از درهٔ تکتونیکی شهر نطنز– بزمان عبور و احتمالاً در به وجود آمدن فعالیّت‌های ماگمایی و آتشفشانی ائوسن [1] نقش دارد. از دیگر ویژگی‌های تکتونیکی ناحیه، فرورفتگی قم – اردکان است که ناحیهٔ مورد مطالعه در بخش جنوبی آن قرار دارد. از دیدگاه تکتونیکی این فرورفتگی در دو مرحلهٔ ساختمانی در طی دوره‌های اُلیگومیوسن و پلیوسن – کواترنری شکل گرفته است. با شروع دوره اُلیگوسن، همزمان با فعالیّت‌های کوه‌زایی، حوضچه‌های کوچک شکل می گیرد که محل انباشت مواد ناشی از فرسایش متعلّق به بخش پائینی سازند قم [2] شده است.در این مرحله بخش اعظم ناحیه غیر از نقاطی که نهشته‌های قاره‌ای سازند قم گسترش دارند، در زیر دریا قرار می‌گیرد. در مرحلهٔ پلیوسن در نتیجهٔ فرونشست‌ها حوضه‌ها به هم پیوسته و فرورفتگی قم – اردکان و همچنین کویر بزرگ شکل می‌گیرد. در پایان اُلیگوسن و ابتدای میوسن با پیشروی دریا، ناحیه در زیر آب قرار می‌گیرد. سپس با عقب‌نشینی دریا در پایان میوسن محیط دریایی تبدیل به محیط کولابی می‌شود و نهشته‌های بخش بالائی زون تکتونیکی قم [3] را بر جای می‌گذارد.

نئوتکتونیک مطالعهٔ حرکات افقی و قائم پوستهٔ زمین از اواخر نئوژن و کواترنر است. برای نئوتکتونیک تعاریف زیادی وجود دارد. محققان بسیاری نئوتکتونیک را آغاز حرکات پوسته ایی زمین بعد از جوانترین فاز کوه‌زایی تعریف کرده اند (استپانکیکوا [4]، استمبرک [5]، ۲۰۰۸، ص. ٦٨). با توجّه به این‌که امکان دسترسی به داده‌های دیرین لرزه‌ای در بسیاری از نقاط وجود ندارد و از طرفی دیگر

1. Eocene
2. L.R.Fm
3. U. R.Fm
4. Stepancikova
5. stembrek

بعضی از روش‌های تعیین تکتونیک فعّال (روش‌های لرزه‌نگاری) بسیار هزینه‌بر هستند، استفاده از شاخص‌های مورفومتری برای تعیین و تشخیص تکتونیک‌های فعّال دارای اهمیّت زیاد است؛ بنابراین شاخص‌های ژئومورفیک ابزار سودمندی برای تحلیل اشکال زمینی و ارزیابی فعالیّت‌های تکتونیکی در نواحی مختلف به شمار می‌آیند.

هدف پژوهش حاضر، بررسی فعالیّت‌های تکتونیکی حوضهٔ آبخیز اردستان با رویکرد کمّی است. در این رابطه با تحقیق و جست‌وجو درمقالات، منابع داخلی، خارجی و مقایسهٔ آن‌ها با یکدیگر دریافتیم اکثر محققان به بررسی پارامترهایی نظیر شاخص‌های سینوسی جبههٔ کوهستان (smf)، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن (Vf)، درصد جبهه‌های کوهستانی ممتد (Eu) و شاخص‌های تحلیل شبکه‌های زه‌کشی از قبیل گرادیان طولی رودخانه (SL)، عامل عدم تقارن حوضه (AF)، عامل تقارن توپوگرافی(T) پرداخته‌اند؛ بنابراین نویسندگان سعی کردند از شاخص‌هایی استفاده شود که کمتر محاسبه شده باشد؛ بنابراین با توجّه به اعتبار شاخص‌های ژئومورفیک در مطالعات ژئومورفولوژی، برای ارزیابی فعالیّت‌های کواترنری پلایای اردستان، به محاسبهٔ شاخص‌های شکل حوضه(BS)، حجم به سطح حوضه(VA)، تراکم سطحی آبراهه(P)، انشعاب‌پذیری(BR)، انتگرال‌هیپسومتری[1] حوضه(HI) و سینوزیته جبههٔ کوهستان(smf) اقدام شد.

۲. پیشینهٔ پژوهش

دانشمندان علوم زمین و به‌ویژه ژئومورفولوژیست‌ها برای تحلیل اشکال زمینی و ارزیابی فعالیّت‌های تکتونیکی در نواحی مختلف دنیا از شاخص‌هایی تحت عنوان شاخص‌های ژئومورفیک استفاده می‌کنند. شاخص‌های ژئومورفیک در سراسر دنیا به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک توسّط افراد زیادی مانند بول و مک فادن[2] (۱۹۷۷)، ولز[3] (۱۹۸۸)، رمیرز حرا[4] (۱۹۹۸)، کونگ و زوچویز[5] (۲۰۰۱)،

1. Hipsometry integral
2. Bull, Macfadden
3.Wells
4. Ramirez-Herrea
5. Couong, Zuchiewicz

سـیلوا[1] (۲۰۰۳)، چـن[2] (۲۰۰۳)، زویلـی و کونسـتانتینیدی وکوکـوولز[3] (۲۰۰۴)، وریـوس، زیگـوری وکوکالاس[4] (۲۰۰۴)، هارکینز، آناستاسـیو و پازالیـا[5] (۲۰۰۵)، فرانکـل و پارزاگلیـا[6] (۲۰۰۶)، گـارنیر و پیروتا[7] (۲۰۰۸)، الحمدونی، ایری گاری، فرناندز، کاکونی و کلر[8] (۲۰۰۸)، کالی و شـجوالکار[9] (۲۰۰۸)، گوربوز و گارور[10] (۲۰۰۸)، ریولند و فورس[11] (۲۰۱۰)، محاسبه شـده اسـت. در ایـران نیـز سـلیمانی (۱۳۷۸)، خیام و مختاری(۱۳۸۲)، مددی، رضایی مقدم و رجایی(۱۳۸۳)، رادفـر و پورکرمـانی(۱۳۸۴)، رجبی، روستایی و مقامی(۱۳۸۵)، حقی پور(۱۳۸۶)، مقصودی (۱۳۸۷)، کرمی(۱۳۸۷)، خطیبی(۱۳۸۸)، زرگرزاده، رنگزن، چرچی و آبشـیرینی (۱۳۸۸)، یمـانی(۱۳۸۹)، امیریـان چـافجیری و قرشـی(۱۳۸۹)، شریفی نجف آبادی(۱۳۸۹)، شاخص‌های ژئومورفیک را در سال‌های اخیر محاسبه کرده‌اند.

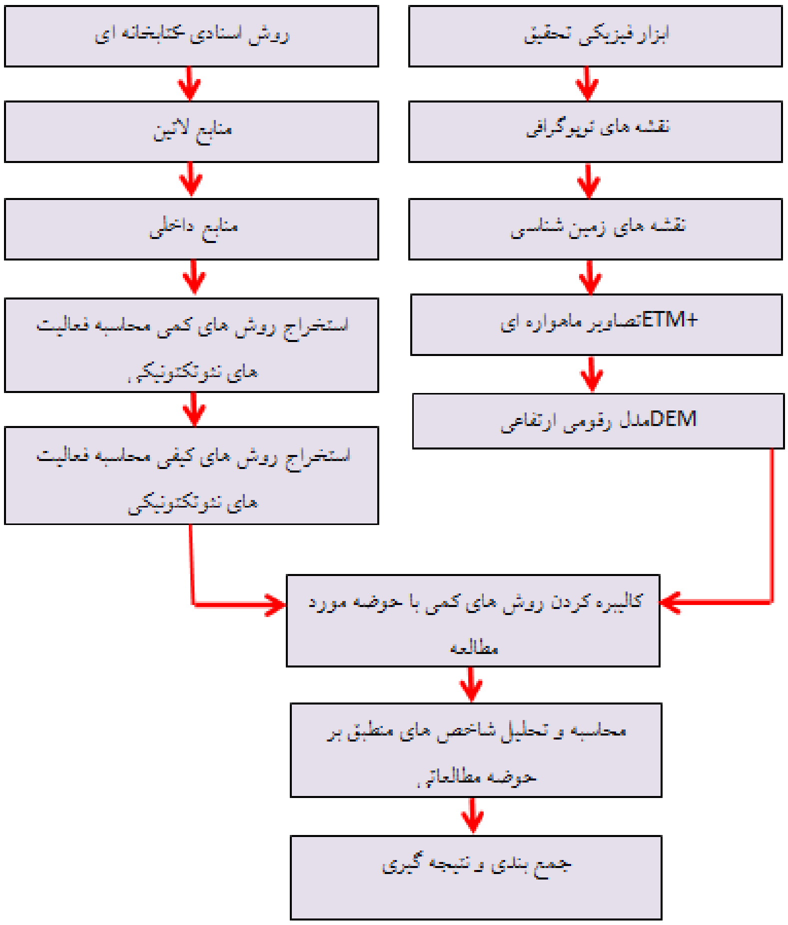
۳. روش‌شناسی

۳. ۱. روش تحقیق

در این پژوهش ابتدا با روش کتابخانه‌ای به جمع‌آوری مقالات، کتب و منابع داخلی و خارجی پرداخته و از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره ای ETM+ 2008 جهت تعیین و مرزبندی منطقه، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ به منظور استخراج لایۀ گسل‌ها و DEM محدوده برای برخی محاسبات استفاده شد. سپس در فرایند تحلیل، ۱۱ روش کمّی برای محاسبۀ میزان فعالیّت نئوتکتونیکی (با توجّه به شرایط زمین‌شناسی، لیتولوژیکی و هیدرولوژیکی) و ۱۵ روش کیفی جهت تحلیل‌های توصیفی تکتونیکی مطرح شد (جدول ۱و۲).

1. Silva
2. Chen
3. Zovili, Konstantinidi, Koukouvelas
4. Verrious, Zygouri, kokkalas
5. Harkins, Anastasio, Pazzalia
6. Frankel, pazzaglia.
7. Guarnieri , Pirrotta
8. EL Hamdouni, Irigary, Fernande, Chacon.y, keller
9. Kali, Shejwalkar
10. Gurbus, Gurer
11. Riolound, Foures

در مرحلة بعد با توجه به اطّلاعات پایه‌ای به کالیبره‌کردن روش‌های کمّی با حوضه‌های مورد مطالعه مبادرت شد. در این راستا سعی شد هریک از روش‌ها با محدودة مورد بررسی همخوانی و تطابق داشته و از پارامترهایی استفاده شود که سایر محققین ژئومورفولوژی کمتر به کار برده‌اند. در نهایت با روش تجربی و با استفاده از نرم‌افزار ARC GIS 9.3 به محاسبة شاخص‌های شکل حوضه(BS)، حجم به سطح حوضه(VA)، تراکم سطحی آبراهه(P)، انشعاب‌پذیری(BR)، انتگرال هیپسومتری حوضه(HI) و سینوزیته جبهة کوهستان(smf) اقدام شد.



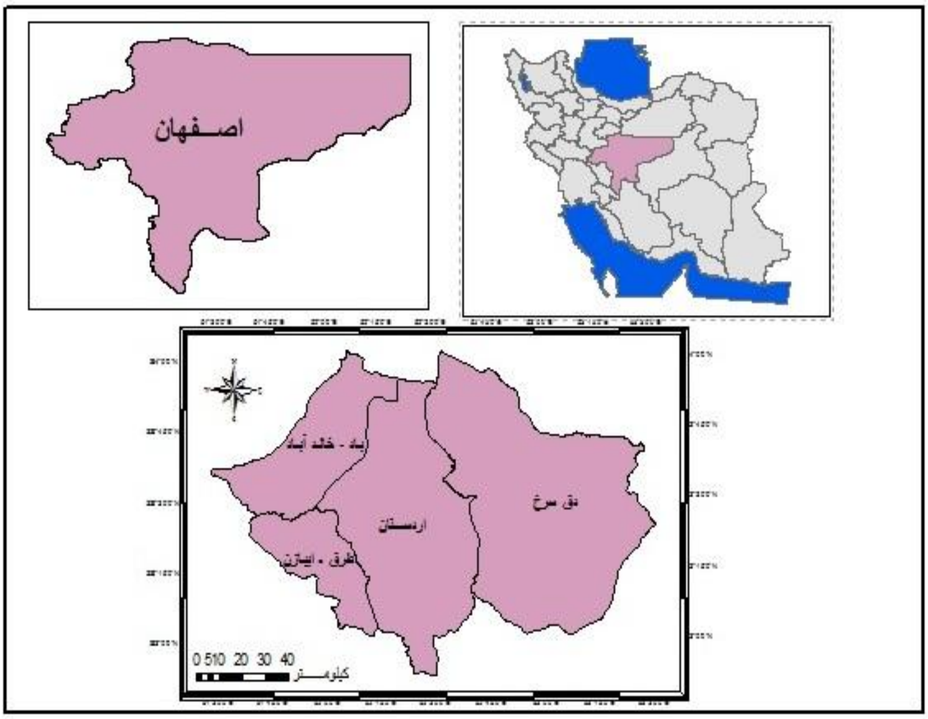
شکل ۱- مراحل انجام پژوهش

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

۳. ۲. منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه در محدودهٔ عرض‌های ۳۲ درجه و ۵۲ دقیقه و ٥٦ ثانیه تا ٣٤ درجه و ۱دقیقه و ۱۸ ثانیهٔشمالی و محدودهٔ طول‌های ۵۱ درجه و ۲۷ دقیقه و ۵۰ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۳۱ دقیقه و ۱۹ ثانیهٔ شرقی قرار دارد.

این منطقه در دامنهٔ شمالی زون سنندج– سیرجان و در بخش جنوبی و قسمت میانی زون تکتونیکی ایران مرکزی قرار گرفته است. از نظر ریخت‌شناسی ارتفاع دربرگیرندهٔ دشت به دلیل ماهیت لیتولوژیکی (اکثراً آذرین) و پایداری نسبی در مقابل عوامل فرسایشی، کمتر دستخوش تغییرات شده و عموماً ستیغ‌های بلندی را می‌سازند.



شکل ۲– موقعیّت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲

٤. مبانی نظری تحقیق

جدول ١- روش‌های کمّی محاسبهٔ تکتونیک فعّال

مأخذ: نگارنده، ١٣٩٢

عنوان	شاخص	نحوه محاسبه
پستی و بلندی های زمین	شاخص انتگرال فراز نما (منحنی هیپسومتری)	$HI = \frac{\Delta H - MinH}{MaxH - MinH}$
	شاخص حجم به سطح حوضه	$\frac{V}{A} = \frac{vi}{Ai}$
شکل حوضه	شاخص شکل حوضه	$BS = \frac{Bl}{BW}$
	نسبت کشیدگی حوضه	$Re = \left(2 \sqrt{\frac{A}{\pi}}\right) BL$
تقارن عرضی حوضه	شاخص عدم تقارن آبراهه	$Af = \frac{Ar}{At}$
	شاخص تقارن توپوگرافی عرضی	$T = \frac{Da}{Dd}$
وضعیت نیمرخ رودخانه	شاخص گرادیان شیب رود	$SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} * L$
پیچ و خم	پیچ و خم رودخانه	$S = \frac{C}{V}$
وضعیت آبراهه ها	شاخص تراکم سطحی آبراهه ها	$P = \frac{\sum Li}{A}$
	شاخص انشعاب پذیری	$[\frac{1}{N-1}] BR = [\frac{N1}{N2} + \frac{N2}{N3} + \cdots \frac{Nn-1}{Nn}]$
وضعیت پیشانی کوهستان	شاخص پیچ و خم جبهه کوهستان	$Smf = \frac{Lmf}{Ls}$
وضعیت جبهه کوهستان	شاخص های سطوح امتداد جبهه کوهستان	$Facet\% \frac{Lf}{Ls}$
		$Fd = \frac{Lmf}{Ls}$
		$Eu = \frac{Lce}{Ls}$
شکل دره	شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره	$Vf = \frac{2Vfw}{[(Eld - Esc) + (Erd - Esc)]}$
شکل دره	شاخص نسبت ساحت دره به ساحت نیم دایره	$V = \frac{Av}{Ac}$
ویژگی های مخروطه افکنه	شاخص وسعت مخروطه افکنه	$Af = CAdn$

جدول ۲- پارامترهای کیفی جهت شناخت تکتونیک فعّال

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲

چشمه های آب گرم و سرد	پشته فشارشی و حوضه های کششی	خزش لغزه های گسل	دره های خطی	آبراهه های منحرف شده
دگر شکلی و خمیدگی تراس های آبرفتی	پشته های مسدود کننده	سکوها	حرکات دامنه ای	آبراه های جابه جا شده
عدم وجود کوهپایه و یا وسعت بسیار کم آن	استخر های فرونشینی	شیب دامنه ها	آبشار ها	پرتگاه های گسلی

۴. ۱. شاخص انتگرال هیپسومتری (منحنی واحد) یا منحنی بی بعد[1]

منحنی ارتفاع‌سنجی از پیاده کردن نسبت کلّ ارتفاع حوضه (ارتفاع نسبی) در مقابل نسبت کلّ مساحت حوضه (مساحت نسبی) به وجود می‌آید. یک روش ساده برای مشخّص کردن شکل منحنی ارتفاع‌سنجی برای یک حوضهٔ زهکشی خاص محاسبه انتگرال ارتفاع‌سنجی است. انتگرال به صورت مساحت زیر منحنی یاد شده است و روش محاسبهٔ آن به صورت زیر است.

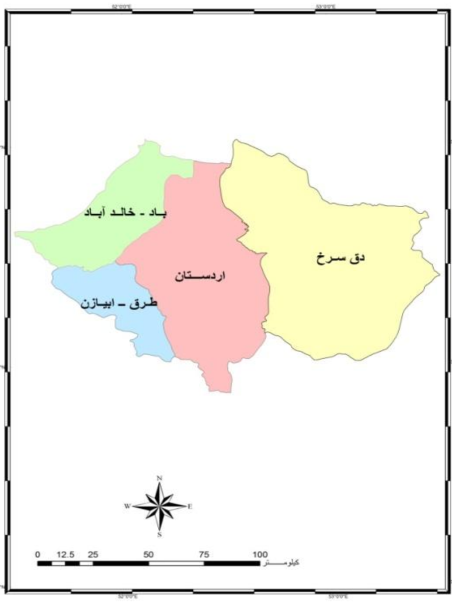
$$Hi = \frac{\text{ارتفاع حداقل} - \text{ارتفاع}}{\text{ارتفاع حداقل} - \text{ارتفاع}} \qquad (۱)$$

مقادیر بزرگ این انتگرال نشانهٔ بزرگ بودن بیشتر توپوگرافی نسبت به میانگین است. رابطهٔ بین انتگرال ارتفاع‌سنجی و درجهٔ توسعه و تجزیه[2] اجازه می‌دهد تا به‌عنوان یک معرّف از مراحل یک چشم انداز تکتونیکی در چرخهٔ فرسایش به کار گرفته شود.

برای محاسبهٔ شاخص انتگرال هیپسومتری ابتدا، حوضهٔ مورد مطالعه به ۴ زیرحوضه تقسیم شد (شکل ۱). سپس در محیط GIS انتگرال ارتفاع‌سنجی (هیپسومتری) محاسبه شد (جدول ۳). انتگرال ارتفاع سنجی در قسمت شمال غرب – جنوب غربی و غرب بیشترین مقدار (۰/۳۰و۰/۲۳) و در نتیجه از نظر تکتونیکی فعّال‌تر بوده ولی در مرکز و شرق کمترین (۰/۱۹۸۰و ۰/۱۵۴۰) مقدار را داشته و کمترین فعالیّت

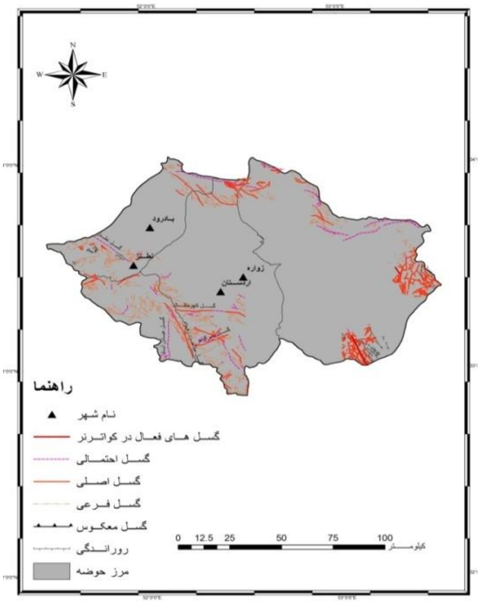
1. Hypsometric integral
2. Dissection

تکتونیکی را از خود نشان می‌دهد. این مسأله با سایر شواهد زمین‌شناختی و ژئومورفولوژیکی تطـابق دارد؛ زیرا از نظر زمین‌شناسی کمترین میزان گسل در شرق حوضهٔ مورد مطالعه مشاهده می‌شود (شـکل ٤) و از منظر ژئومورفولوژیکی، شرق حوضه دقیقاً منطبق بر پلایای دق سرخ است که بـه‌عنـوان حوضـهٔ انتهـایی شبکهٔ آب‌های منطقه قلمداد می‌شود و از فعالیّت تکتونیکی کمتری برخوردار است.



شکل ۳- زیرحوضه‌های حوضهٔ آبخیز دق سرخ

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲



شکل ٤- نقشهٔ گسل‌های منطقه

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲

جدول ۳- انتگرال ارتفاع سنجی به دست آمده برای حوضه‌های مورد مطالعه

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲

نام حوضه	حداقل ارتفاع (M)	حداکثر ارتفاع (M)	متوسط ارتفاع (M)	انحراف معیار ارتفاع (M)	حداکثر شیب (%)	متوسط شیب (%)	انحراف معیار شیب (%)	انتگرال ارتفاع سنجی	کلاس فعالیت
باد خالد آباد	۹۵۴/۳۲	۳۸۲۷/۴۱	۱۵۲۳/۴۶	۶۰۰/۵۴	۶۱/۰۳	۶/۴۹	۸/۶۹	۰/۱۹	۳
طـــرق ابیازن	۱۳۵۷/۱۷	۹۴۳۸۴۰	۲۱۱۳/۷۱	۳۱۳/۸۵	۴۷/۲۳	۷/۹۸	۷/۰۲	۰/۳۰	۱
اردستان	۹۲۲/۲۹	۳۲۳۱/۰۸	۱۴۷۰/۵۳	۵۰۸/۸۷	۵۲/۸۴	۴/۵۵	۵/۸۹	۰/۲۳	۲
دق سرخ	۹۳۰/۰۹	۲۸۹۷/۵۹	۱۲۳۳/۲۶	۳۰۸/۴۱	۵۶/۹۳	۲/۴۲	۳/۴۵	۰/۱۵	۳

٤. ۲. شاخص سینوزیته جبهۀ کوهستان یا پیچ و خم پیشانی کوهستان[1] (Smf)

پیچ و خم جبهۀ کوهستان(Smf) شاخصی است که تعادل و توازن بین شرایط آب و هوایی و نیروهای فرسایشی لیتولوژی و نیروهای تکتونیکی که موجب ایجاد جبهۀ کوهستان مستقیم که منطبق با کوهستان‌های جهش‌یافته با گسل فعّال می‌باشند را نشان می‌دهد. پیچ و خم جبهۀ کوهستان با صورت زیر تعریف می شود.

$$Smf = \frac{Lmf}{Ls} \quad (۲)$$

Smf: پیچ و خم جبهۀ کوهستان، Lmf: طول جبهۀ کوهستان ودشت،LS : طول خط مماس بر جبهۀ کوهستان.

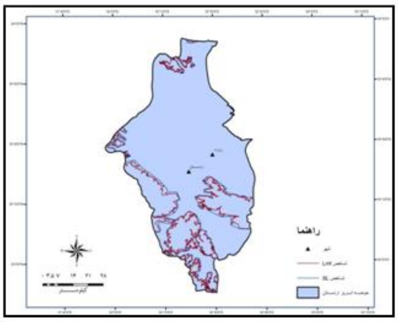
شاخص سینوزینه، جدال بین نیروهای فرسایش‌دهنده که سعی در فرسایش دادن جبهۀ کوهستان را دارند از یک طرف و نیروی تکتونیکی که باعث ایجاد نیروی صاف و مستقیم می‌شود را از طرف دیگر بیان می‌کند، حال اگر نیروهای فرسایش‌دهنده غلبه داشته باشند، نرخ بالای Smf نشان داده می‌شود و اگر نیروهای تکتونیکی فعّال باشند، عدد Smf کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر از نظر کمّی شاخص Smf برای مناطق بسیار فعّال تکتونیکی بین (۱ تا ۱/٦)، برای مناطق با فعالیّت متوسّط بین (۱/٤ تا ۳) و برای جبهۀ کوهستانی غیرفعّال از حدود ۱/۸ تا بیشتر از ۵ است (مددی، رضایی مقدم، رجایی، ۱۳۸٤، ص. ۱۲٤).

جدول ٤– محاسبۀ شاخص سینوزیته جبهۀ کوهستان

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲

نام حوضه	Lmf(M)	LS(M)	Smf	کلاس فعالیت
باد – خالد آباد	۲۹۹۱۱۸/۲۲	۱۱۱۹۱۰/۱۶	۲/۶۷	۲
طرق – لیازن	۷۱۶۰۵۰/۰۲	۶۶۶۱۹۱/۹۱	۱/۰۷	۱
اردستان	۱۲۶۷۳۲۲/۴۱	۶۵۶۹۷۳/۹۴	۱/۹۲	۲
دق سرخ	۹۷۲۷۵۰/۸۱	۴۸۶۹۴۴/۲۶	۲	۲

1. mountain front sinuosity



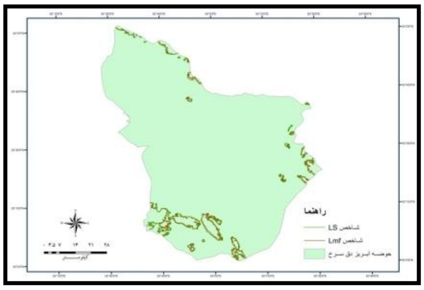
شکل ٥- نقشهٔ شاخص سینوزیته جبههٔ کوهستان برای حوزهٔ اردستان

مأخذ: نگارنده، ١٣٩٢



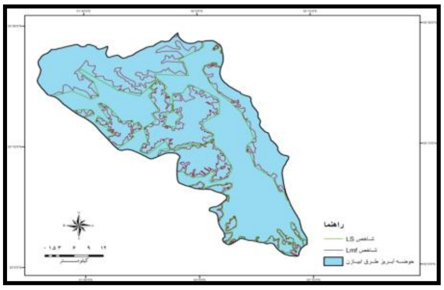
شکل ٦- نقشهٔ شاخص سینوزیته جبههٔ کوهستان برای حوزهٔ باد خالدآباد

مأخذ: نگارنده، ١٣٩٢



شکل ٧- نقشهٔ شاخص سینوزیته جبههٔ کوهستان برای حوزهٔ دق سرخ

مأخذ: نگارنده، ١٣٩٢



شکل ٨- نقشهٔ شاخص سینوزیته جبههٔ کوهستان برای حوزهٔ طرق ابیازن

مأخذ: نگارنده، ١٣٩٢

٤. ٣. شاخص شکل حوضه (BS)

حوضه‌های فعّال تکتونیکی، شکل کشیده‌ای دارند. شکل حوضه در طول زمان با توقف میزان بالا آمدگی، به تدریج دایره می‌شود(بربنک و اندرسون[1]، ٢٠٠٣، ص. ٢٠٣) مطالعات سایر محققان نیز این موضوع را ثابت کرده است رامیز[2] (١٩٩٨)، گوربوز و پیروتا (٢٠٠٨) و مختاری (١٣٨٤). به عبارت دیگر در مناطق کوهستانی هرچه شکل حوضه کشیده‌تر باشد، از فعالیّت زمین‌ساختی بیشتری برخوردار است و با گذشت زمان و پیرشدن حوضه شکل آن به دایره نزدیک می‌شود. در مناطق فعّال زمین‌ساختی عرض

1. Burbank and Anderson
2. Ramiz

حوضه‌های آبریز باریک‌تر است؛ زیرا در چنین مناطقی نیروی رودخانه صرف ژرف کردن بستر خود می-شود، در حالی که پایداری زمین‌ساختی باعث می‌شود رودخانه فرصت تعریض بستر خود را داشته باشد.

نسبت شکل حوضه با رابطهٔ $BS = \frac{BI}{BW}$ بیان می‌شود.

BS : نسبت شکل حوضه،BI، اندازهٔ طول حوضه از انتهایی‌ترین مقسم آب تا خروجی حوضه، BW: پهنای حوضه در پهن‌ترین قسمت.

حوضه‌هایی که با مقادیر زیاد BS یعنی بیشتر از ٤ مشخّص می‌شوند، از نظر تکتونیکی فعّال هستند. زمانی که BS بین ۳ تا ٤ باشد، حوضه‌ها از نظر فعالیّت زمین‌ساختی در کلاس ۲ قرار دارند و مقادیر کمتر از ۳، حوضه‌های دایره‌ای‌شکل را نشان می‌دهند که از نظر فعالیّت، غیرفعّال هستند(حمدونی، ایرگاری، فرناندز، چاکون و کلر، ۲۰۰۸، ص. ۱٦۹).

جدول ۵- محاسبهٔ شاخص شکل حوضه

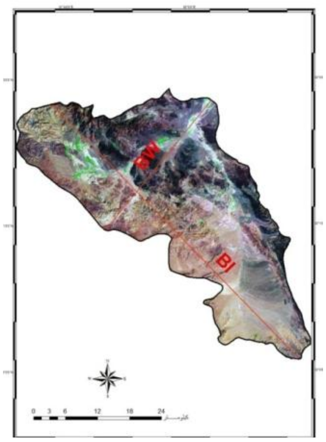
مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲

نام حوضه	BI (M)	BW(M)	BS	کلاس فعالیت
باد - خالد آباد	۱۰۰۳۶۶/۴۵	۳۰۱۶۶/۷۳	۳/۳۲	۲
طرق - ابیازن	۶۷۱۰۲/۵۳	۳۱۳۸۷/۳۴	۲/۱۳	۳
اردستان	۱۱۵۵۱۵/۷۳	۶۶۶۴۸/۳۹	۱/۷۳	۳
دق سرخ	۱۲۴۳۱۳/۰۹	۸۵۳۹۱/۷۹	۱/۴۵	۳



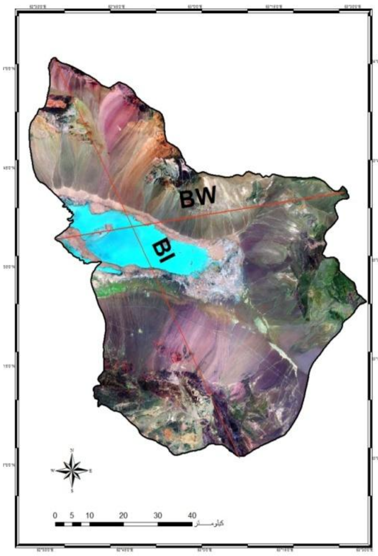
شکل ۱۰- شاخص BS، حوضهٔ باد- خالدآباد

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲



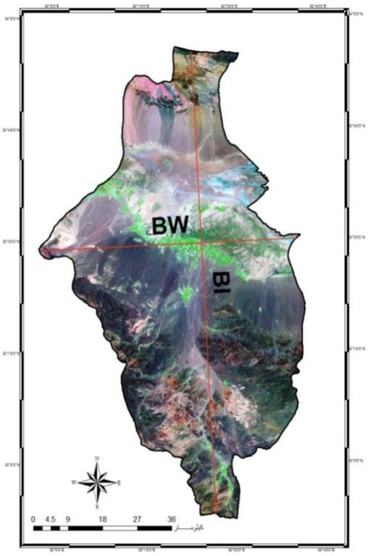
شکل۹- شاخص BS، حوضهٔ طرق- ابیازن

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲



شکل ۱۱- شاخص BS، حوضه اردستان

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲



شکل ۱۲- شاخص BS، حوضه دق سرخ

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲

۴. ٤. شاخص حجم به سطح حوضه

شاخص حجم به سطح حوضه از (رابطهٔ ۱) محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{VA} = \frac{Vi}{Ai} \quad (۳)$$

VA: مقدار عددی شاخص حجم به سطح حوضه

vi: حجم حوضه

Ai: مساحت حوضه

مقدار عددی زیاد برای این شاخص نشان‌دهندهٔ پستی و بلندی زیاد و فعالیّت شدید زمین ساختی در منطقه است (هارکینز[1]، ۲۰۰۵، ص. ٤۳).

1. Harkins

جدول ٦- مقادیر شاخص(VA) در حوضه آبریز دق سرخ

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲

نام حوضه	حداقل ارتفاع (M)	حداکثر ارتفاع (M)	حجم حوضه (M³)	مساحت حوضه (M²)	شاخص VA	کلاس فعالیت
باد خالد آباد	۹۵۱	۳۸۱۹	/۹۷ ۱۱۷۶۷۹۹۳۳۵۴۱۴	/۲۸ ۲۰۹۳۴۱۶۲۸۹	/۱۴ ۵۶۲	۲
طرق ابیازن	۱۳۵۳	۳۸۴۵	/۳۲ ۹۵۸۸۸۲۹۸۰۴۷۰	/۱۵ ۱۲۷۵۸۷۷۰۰۸	/۵۴ ۷۵۱	۱
اردستان	۹۲۶	۳۲۳۲	/۴۴ ۲۳۶۳۲۵۳۱۶۴۰۱۹	/۶۴ ۴۳۷۳۹۳۲۴۲۴	/۳۰ ۵۴۰	۲
دق سرخ	۹۲۶	۲۹۰۹	/۱۵ ۱۸۹۵۹۰۰۳۶۶۰۲۰	/۵۶ ۶۲۲۰۱۲۶۰۴۷	/۸۰ ۳۰۴	۳

با دقّت در این شاخص درمی‌یابیم که قسمت‌های شمال، شمال غرب و جنوب غرب محدودهٔ مورد مطالعه از نظر تکتونیکی فعّال هستند. این قسمت‌ها دقیقاً منطبق بر حوضه‌های باد خالدآباد و طرق ابیازن است که به ترتیب دارای کلاس فعالیّت ۲ و ۱ هستند. از سوی دیگر بررسی نقشهٔ گسل-های منطقه فعّال بودن این بخش از حوضه را تأیید می‌کند. گسل‌های مهمّی نظیر میلاجرد- زفره و کچومثقال در حوضهٔ طرق ابیازن، گسل معروف نطنز در حوضهٔ باد خالدآباد، گسل‌های ماربین رنگان، بر گوهر و کچومثقال در نیمهٔ جنوبی حوضهٔ اردستان این محدوده‌ها را از نظر تکتونیکی ناآرام کرده اند. تنها پلایای دق سرخ با کمترین مقدار VA (۳۰٤/۸۰) منطقه‌ای غیرفعّال از نظر تکتونیکی محسوب می‌شود.

٤. ٥. شاخص تراکم سطحی آبراهه‌ها[1](P)

این عامل از تقسیم طول شبکهٔ هیدروگرافی حوضه (شامل شبکه‌های اصلی و فرعی) به مساحت حوضه به دست می‌آید و شاخص مفیدی جهت ارزیابی و شناسایی نئوتکتونیک در حوضه‌های زهکشی محسوب می‌شود. در این شاخص هرچه ضریب تراکم بیشتر باشد، بیانگر تکتونیک فعّال و حساسیت زیاد سازندها و تشکیلات زمین‌شناسی موجود در حوضه است. همچنین نشان از جوان بودن و نرسیدن به مرحلهٔ تعادل حوضهٔ زهکشی دارد. این شاخص از (رابطهٔ ۲) محاسبه می شود.

1. Drainage Density

$$P = \frac{\Sigma li}{A} \quad (٤)$$

در رابطهٔ بالا P: تراکم زهکشی، Σli: طول آبراهه به کیلومتر، A: مساحت حوضه به کیلومتر مربع است.

جدول ۷- محاسبهٔ شاخص p برای حوضه‌های مورد مطالعه

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۲

نام حوضه	Σli	A	P	کلاس فعالیت
باد خالد آباد	۱۲۹۰/۰۸	۲۰۹۳/۴۱	۰/۶۱	۱
طرق لیازن	۷۴۱/۳۷	۱۲۷۵/۸۷	۰/۵۸	۲
اردستان	۲۳۷۷/۴۸	۴۳۷۳/۹۳	۰/۵۴	۳
دق سرخ	۳۵۰۷/۹۸	۶۲۲۰/۱۲	۰/۵۶	۳

٤. ٦. شاخص انشعاب پذیری[1] (Br)

انشعاب‌پذیری به نسبت تعداد قطعات یک رده به تعداد قطعات مرتبهٔ بالاتر گفته می‌شود. این شاخص به علّت تغییرات تصادفی در هندسهٔ حوضهٔ آبریز از مرتبه‌ای به مرتبهٔ دیگر یکسان نخواهد بود، امّا تمایل دارد که در تمام سری‌ها ثابت باشد. هرقدر نسبت انشعاب بزرگتر باشد، بیانگر فعالیّت تکتونیکی بیشتر و جوان بودن حوضه است. این شرایط باعث افزایش آبراهه‌های رتبه پایین‌تر می‌شود. نسبت انشعاب پایین از خصوصیات حوضه‌هایی است که آشفتگی‌های ساختاری کمتری دارند و الگوی زهکشی در آن‌ها غیرطبیعی نیست. شاخص مورد بحث از (رابطهٔ ۳) به دست می‌آید.

$$[\frac{1}{N-1}]\, BR = [\frac{N1}{N2} + \frac{N2}{N3} + \cdots \frac{Nn-1}{Nn}] \quad (٥)$$

که در آن N1: تعداد شاخه‌های ردهٔ یکم، N2: تعداد شاخه‌های ردهٔ دوم، N3: تعداد شاخه‌های ردهٔ سوم و n تعداد شاخه‌های ردهٔ n ام است.

---

1. Bifurcation ratio

با توجّه به محاسبات صورت‌گرفته زیرحوضهٔ طرق ابیازن با بیشترین نسبت انشعاب ۵/٤۹ به عنوان فعّال‌ترین زیرحوضه و زیرحوضهٔ دق سرخ با کمترین نسبت انشعاب (۱/۹۰) کمترین فعّالیت تکتونیکی را نشان می‌دهد.

با دقّت در نقشه‌های زمین‌شناسی و نقشهٔ گسل‌های منطقه صحّت مطالب فوق تایید می‌شود؛ چرا که از زیرحوضهٔ طرق ابیازن که به‌عنوان فعّال‌ترین زیرحوضه شناخته می‌شود، گسل‌های مهمّی نظیر میلاجرد- زفره و کچومثقال عبور می‌کنند. زیرحوضهٔ دق سرخ به‌عنوان پلایا، بدون داشتن گسل مهمّی شرایطی کاملاً آرام و غیرفعّال دارد.

جدول ۸- محاسبهٔ شاخص انشعاب‌پذیری(BR)

مأخذ: نگارنده،۱۳۹۲

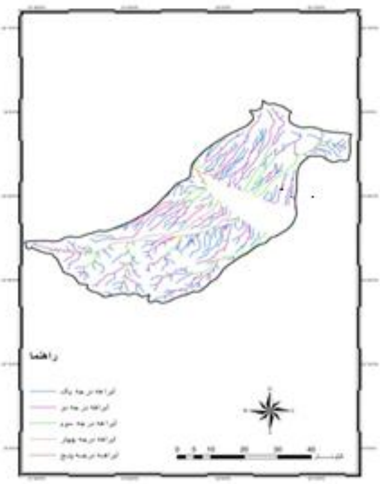
رتبه آبراهه / نام حوضه	N1	N2	N3	N4	N5	BR	کلاس فعالیت
باد خالد آباد	۳۹۸	۱۸۸	۸۱	۲۳	۳	۳/۹۰	۲
طرق ابیازن	۲۹۲	۱۰۸	۵۶	۶۶	۴	۵/۴۹	۳
اردستان	۱۰۴۲	۴۷۸	۱۸۵	۱۷۶	۸۹	۱/۹۴	۱
دق سرخ	۱۳۸۸	۵۷۹	۳۳۰	۱۹۴	۱۱۰	۱/۹۰	۱



شکل ۱۳- نقشهٔ شاخص BR

حوضهٔ اردستان

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲



شکل ١٤- نقشهٔ شاخص BR

حوضهٔ باد- خالدآباد

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲



شکل ۱۵- نقشهٔ شاخص BR

حوضهٔ دق‌سرخ

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲



شکل ۱٦- نقشهٔ شاخص BR

حوضهٔ طرق ابیازن

مأخذ: نگارنده، ۱۳۹۲

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش به علّت ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی متفاوت حوضهٔ آبخیز اردستان و وجود سه واحد ژئومورفولوژیک کاملاً واضح (کوهستان، دشت سر، پلایا)، محدودهٔ مطالعاتی به ٤ زیرحوضه تقسیم شد. پس از آن فعالیّت‌های زمین‌ساختی منطقه با استفاده از ٦ شاخص ژئومورفیک، مبتنی بر مورفولوژی حوضه و شبکهٔ زهکشی ارزیابی شد. برای نیل به این مقصود از شاخص ارزیابی نسبی فعّالیت‌های تکتونیکی (Lat)[1] استفاده شد که از (رابطهٔ ٤) به دست می آید.

$$Lat = \frac{S}{N} \qquad (٦)$$

Lat= شاخص ارزیابی نسبی فعالیّت‌های تکتونیکی، S= مجموع کلاس‌های شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه‌شده و N= تعداد شاخص‌های محاسبه‌شدهٔ طبقات مختلف شاخص Lat به صورت زیر است (الحمدونی، ایرگاری، فرناندز، چاکون و کلر،۲۰۰۸، ص. ۱۷۱).

1. Index of Relative Active Tectonic

۱<Lat<۱/۵ فعالیّت زمین ساختی شدید،۲<Lat> ۱/۵ فعالیّت تکتونیکی زیاد، ۲/۵ >Lat>۲ فعالیّت زمین ساختی متوسّط، ۲/۵<Lat فعالیّت‌های کم و ناچیز.

جدول ۹- محاسبهٔ شاخص Lat برای محدودهٔ مطالعاتی

مأخذ: نگارنده،۱۳۹۲.

نام حوضه	HI	SMF	BS	VA	P	BR	LAT	کلاس فعالیت
باد خالد آباد	۳	۲	۲	۲	۱	۲	۲	فعالیت تکتونیکی زیاد
طرق لیازن	۱	۱	۳	۱	۲	۳	۱/۸۳	فعالیت تکتونیکی زیاد
اردستان	۲	۲	۳	۲	۳	۱	۲/۱۶	فعالیت زمین ساختی متوسط
دق سرخ	۳	۲	۳	۳	۳	۱	۲/۵	فعالیت زمین ساختی متوسط

نتایج (جدول ۹) نشان می‌دهد که بخش‌های شمال غرب و جنوب غرب محدودهٔ مورد مطالعه از نظر تکتونیک بسیار فعّال‌تر از قسمت‌های مرکزی و شرقی حوضه است. به‌گونه‌ای که شاخص (Lat) بیانگر فعالیّت زیاد در حوضهٔ طرق-ابیازن و باد خالدآباد و میزان فعّالیت زمین‌ساختی متوسّط در حوضه‌های اردستان و دق سرخ است.

(شکل ٤) موقعیّت تکتونیکی منطقه و نقشهٔ گسل‌های موجود در حوضهٔ اردستان و حوضه‌های مجاور را بر مبنای نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ نشان می‌دهد. گسل‌های موجود در نقشه با یافته‌ها و محاسبات شاخص Lat منطبق است، به‌گونه ای که بخش‌های شمال غرب و غرب محدودهٔ مطالعاتی بیشترین فراوانی گسل‌ها را داشته و دقیقا در همین محدوده بالاترین شاخص Lat به دست آمده است. به نظر می‌رسد فعّالیت بخش‌های شمال غرب و جنوب غرب، به عبور گسل‌های مهم قم – زفره و نطنز مربوط می‌شود. این در حالی است که در قسمت‌های مرکزی و شرقی حوضه که کمترین تراکم گسل‌ها را دارند، پایین‌ترین میزان Lat به دست آمده است.

کتاب‌نامه

۱. امریان چافجیری، م. ر.، قرشی، م. (۱۳۸۹). برآورد جنبایی حاشیهٔ شمالی البرز میان چالوس تا رود سر بر پایهٔ شاخص‌های مورفوتکتونیکی (شاخص‌های سه بعدی). *فصل‌نامهٔ زمین*، *۵*(۱)، ۹٤-۷۸.

۲. حقی‌پور، ن. (۱۳۸٦). بررسی ریخت زمین‌ساختی گسترهٔ کپه داغ- بینالود بر پایهٔ شاخص‌های گرادیان شیب رود و هیپسومتری. *فصل‌نامهٔ علوم زمین*، *۱٦*(۲۹)، ٦٤-۱۹.

۳. خطیبی بیاتی، م (۱۳۸۸). تشخیص فعّالیت‌های نئوتکتونیکی در حوضهٔ آبریز قرنقوچای با استفاده از شاخص های ژئومورفیک و مورفوتکتونیک. *فضای جغرافیایی*، ۹(۲۵)، ۵۰-۲۳.

٤. خبازی، م. (۱۳۹۱). *بررسی پالئوژئومورفولوژی کویر دق سرخ*. (رسالهٔ منتشرنشدهٔ دکتری ژئومورفولوژی)، دانشگاه اصفهان، ایران.

۵. خیام، م.، مختاری کشکی، د. (۱۳۸۲). ارزیابی عملکرد فعالیّت‌های تکتونیکی بر اساس مرفولوژی مخروطه افکنه‌ها. *پژوهش‌های جغرافیایی*، *٤٤*، ۱۰-۱.

٦. رادفر، ش.، پورکرمانی، م. (۱۳۸٤).ریخت زمین ساخت گسل کوهبنان. *مجلهٔ علوم زمین*، *۱۵*(۵۸) ، ۹۹-۷۰.

۷. رجبی، م.، روستایی، ش.، مقامی مقیم، غ. (۱۳۸۵). تحلیل فعالیّت‌های نئوتکتونیکی در دامنه‌های جنوبی ارتفاعات آلاداغ در شمال شرقی ایران. *جغرافیا و توسعه*، *۸*، ۱۹۱-۱۷۷.

۸. زرگرزاده، م.، رنگزن، ک.، چرچی، ع.، آبشیرینی، ا. (۱۳۸۸). کاربرد **GIS** و شاخص‌های ژئومورفیک در پهنه‌بندی تکتونیک فعال زون زاگرس. *مجموعه مقالات همایش ژئوماتیک*. ۲۰ اردیبهشت ۱۳۸۸. (صص. ۱۰-۱). تهران.

۹. سلیمانی، ش. (۱۳۷۸). *رهنمودهایی در شناسایی حرکات تکتونیکی فعال و جوان با نگرشی بر مقدمات دیرینهٔ لرزه شناسی*. چاپ اوّل. تهران: انتشارات موسسهٔ بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

۱۰. کرمی، ف. (۱۳۸۸). ارزیابی ژئومورفیک فعالیّت‌های تکتونیکی در حوضهٔ زهکشی سعیدآباد چای. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. ٦٩ ،۸۲- ٦٧ .

۱۱. مختاری کشکی، د. (۱۳۷٦). *تحلیل برخی از مسائل مورفودینامیک دامنهٔ شمالی میشو و دشت سیلابی کشکسرای*. (پایان‌نامهٔ منتشرنشدهٔ کارشناسی ارشد جغرافیا). دانشگاه تبریز، ایران.

۱۲. مختاری کشکی، د. (۱۳۷۹). آسیب پذیری سکونتگاه‌های واقع در مسیر خطوط گسل و عمران روستایی *مجلهٔ مسکن و انقلاب*. ۹۱ و ۹۲، ۷٤-۷۰.

۱۳. مددی، ع.، رضایی مقدم، م. ح.، رجایی، ع. (۱۳۸۳). تحلیل فعالیّت‌های نئوتکتونیک با استفاده از روش های ژئومورفولوژی در دامنه‌های شمال غربی تالش (باغروداغ). *پژوهش‌های جغرافیایی*، ۳٦(۵۰)، ۱۳۸-۱۲۳.

۱٤. یمانی، م.، باقری، س.، جعفری اقدم، م. (۱۳۸۹). تاثیر نوزمین ساخت در مورفولوژی آبراهه‌های حوضه چله (زاگرس غربی). *محیط جغرافیایی* ، *۱*(۱)، ۸۲-٦۷.

15. Amerson, B. E., Montgomery, D. R., & Meyer, G. (2007). Relative size of fluvial and glaciated valleys in central Idah . *Geomorphology, 93*(3), 537-547.
16. Andeson, J. G., Brune, J. N., Anooshehpoor, R., & Ni, S. D. (2000). New ground motion data and concepts in seismic hazard analysis. *Current Science Bangalore*, *79*(9), 1278-1290.
17. Bull, W. B., & McFadden, L. D. (1977). Tectonic geomorphology northand south of the Garlock fault, California. In D. O. Doehring, D.O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions*. *Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium (pp. 115-138).* Binghamton: State University of NewYork.
18. Burbank, D. W., & Anderson, R. S .(2000). *Tectonic Geomorphology* . UK: Blackwell Publisher
19. El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology, 96(*1), 150-173.
20. Guarnieri P., & Pirrotta, C. (2008). The response of drainage basins to the late Quaternary tectonic in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily) . *Geomorphology, 95*(3), 260-273.
21. Hesami, K., Pantosti, D., Tabassi, H., Shabanian, E., Abbassi, M. R., Feghhi, K., & Solaymani, S. (2003). Paleo earthquakes and slip rates of the North Tabriz Fault, NW Iran. *Annals of Geophysics*, *46*(5), 903-915.
22. Keller E. A., & Pinter, N. (1996). *Active tectonics.* New Jersey: Prentice Hall Inc.
23. Ramirez, H. (1998) .Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt . *Earth Surface Processes and Landforms, 23*(4), 317-332.
24. Silva P. G., Goy, J. L., Zazo, C., & Baradaji, T. (2003). Fault-generated mountain front in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology, 50*(1), 203-225.